



矿山地质灾害 与地质环境

张永波 张志祥 时红 陈军锋 郭亮亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

矿山地质灾害 与地质环境

张永波 张志祥 时红 陈军锋 郭亮亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以采煤沉陷区地质灾害防治、地质环境问题治理及采空区建筑地基处置等3个关键科学问题为核心,综合运用采矿工程、岩石力学、水文地质学、工程地质学、灾害地质学等多学科的前沿理论,采用野外调查、现场实测、相似材料模拟实验、注浆试验、数值模拟计算、理论分析等多种方法,研究采空区覆岩移动与变形规律,探讨采煤沉陷区地面塌陷、滑坡、泥石流等地质灾害的形成机制及综合防治技术;研究采煤对地形地貌景观、土地资源和水资源的破坏及其保护技术;研究采空区建筑地基稳定性评价标准和方法,研究采空区碎裂岩体渗透注浆浆液扩散规律、注浆处置工程及采空区上部建筑物抗变形结构的设计理论和技术等。研究内容可为我国广大采煤沉陷区地质灾害防治、地质环境问题治理以及采空区建筑地基处置等提供理论依据。

本书可供水文地质与工程地质、环境地质与灾害地质、水文与水资源工程、地下水科学与工程、采矿工程、环境工程及岩土工程等专业科研、工程技术人员以及高等院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山地质灾害与地质环境 / 张永波等著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-5170-6310-0

I. ①矿… II. ①张… III. ①矿山地质—地质灾害②
矿山地质—地质环境 IV. ①TD1②P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第030610号

书 名	矿山地质灾害与地质环境
作 者	KUANGSHAN DIZHI ZAIHAI YU DIZHI HUANJING 张永波 张志祥 时红 陈军锋 郭亮亮 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 24印张 569千字
版 次	2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷
定 价	138.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国是世界上煤炭资源比较丰富的国家之一，多年的煤炭开采在为经济社会发展做出贡献的同时，也使矿山产生了大面积的采空区，引发了地面塌陷、地裂缝、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害，并导致地形地貌景观、土地资源及水资源的破坏，严重制约着区域经济社会的可持续发展，威胁着矿区广大人民群众的生命财产安全。因此，开展矿山地质灾害与地质环境问题形成机制及其综合防治技术的研究，可有效避免和减少地质灾害和地质环境问题给人民生命财产造成的损失，对维护社会稳定、保障生态环境、促进国民经济和社会可持续发展具有重要的理论及现实意义。

随着我国经济的不断发展，由于可供建筑的地面严重不足，一些地区工业厂房和住宅楼不得不建在采空区上方。在建筑物荷载作用下，有可能使原本处于相对平衡状态的冒裂带岩体重新“活化”，使冒裂带岩体再压密、地下残留空洞再冒落，导致地表产生附加移动和变形，进而使新建建筑物沉降、局部开裂、倾斜、直至倒塌。大面积、大规模的采空区已成为高速公路、现代化铁路、机场、引黄水利工程、西气东输工程等重大基础工程建设及小城镇建设规划的制约因素。

2003—2013年期间，作者共承担了六个与矿山地质灾害、地质环境问题及采空区建筑地基处置等有关的科研项目，本书是这些研究成果的集成。

全书共分3篇。第1篇为矿山地质灾害，包括第1章、第2章、第3章及第4章。第1章应用现场观测、相似材料模拟实验和数值模拟技术，研究不同地质采矿条件下的覆岩移动和地表变形规律，研究采动岩体分形裂隙网络演化及覆岩岩体损伤破坏规律；第2章主要介绍采空塌陷地质灾害的形成机制及其综合防治技术；第3章根据采动滑坡的发育特征，通过分析采动坡体的附加应力分布，建立采动滑坡稳定性预测模型，探讨采动滑坡地质灾害的形成机制及其综合防治技术；第4章主要介绍矿山泥石流的物质来源、水动力条件和起动机理，研究矿山泥石流活动性和危险度的评价方法，探讨矿山泥石流地质灾害的形成机制及其综合防治技术。

第2篇为矿山地质环境，包括第5章和第6章。第5章主要介绍矿山开采对地形地貌景观和土地资源的破坏机制、矿区土地复垦标准及其修复技术；

第6章主要介绍矿山开采对水资源的破坏模式和影响机理,研究开采对水资源影响的预测方法,探讨矿区地下水资源保护技术。

第3篇为采空区地基稳定性评价及处置,包括第7章、第8章及第9章。第7章根据采动覆岩的岩体结构类型,分析老采空区覆岩“活化”的机理,建立采空区单岩块绞接力学模型,分析块裂结构岩体的失稳形式,探讨采空区建筑地基变形的破坏规律及其稳定性评价标准;第8章通过注浆实验,研究采空区碎裂岩体渗透注浆浆液扩散规律,探讨采空区充填注浆处置范围的确定及其相关技术;第9章主要介绍采空区建筑地基附加应力的分布特征和计算方法,探讨抗采动变形建筑结构设计的基本理论。

本书撰写分工如下:第1章由张永波、郭亮亮撰写,第2章、第5章、第6章由张志祥撰写,第3章、第4章由陈军锋撰写,第7章、第8章、第9章由时红撰写。张永波统稿全书。

本书研究成果是在山西省科技厅、山西省交通厅、山西省国土资源厅、中国地质环境监测院等单位的研究项目资助下完成的,没有这些项目的资助就不可能取得这些成果。研究工作及撰写过程中先后得到多位专家及学者的大力协助与支持,并提出了许多宝贵意见。在本书编写过程中,还得到了焦俊虎、刘秀英、张观瑞、孙占法、王鹏、魏义强、王玉婷、李王坤、刘鹏、陈龙、张利民等研究生的大力支持和帮助。在本书出版之际,谨向为本书研究和出版工作给予支持和帮助的所有单位和个人致以最诚挚谢意。本书引用了许多专家学者的观点及图表,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免出现疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2017年8月

目 录

前言

第1篇 矿山地质灾害

第1章 采空区覆岩移动与变形规律	1
1.1 采空塌陷的形成机制	1
1.2 矿山塌陷的基本规律和特征	4
1.3 采空区覆岩移动变形规律的相似模拟实验研究	7
1.4 采空区覆岩移动变形规律的数值模拟研究	77
第2章 采煤沉陷区地面塌陷、地裂缝地质灾害及其综合防治技术	99
2.1 采煤沉陷区地面塌陷、地裂缝地质灾害	99
2.2 采空区调查与勘查技术	102
2.3 开采沉陷的预计	105
2.4 地面变形规律的相似模拟实验研究	109
2.5 地面变形规律的数值模拟研究	125
2.6 地面塌陷、地裂缝地质灾害综合防治技术	130
第3章 采煤沉陷区滑坡、崩塌地质灾害及其综合防治技术	137
3.1 采煤沉陷区滑坡、崩塌的分类及其特征	137
3.2 矿山滑坡、崩塌的成因和影响因素	138
3.3 矿山滑坡、崩塌的勘察	143
3.4 矿山滑坡、崩塌的稳定性评价	157
3.5 矿山滑坡、崩塌的综合防治技术	169
第4章 采煤沉陷区泥石流地质灾害及其综合防治技术	189
4.1 矿山泥石流的分类及基本特征	189
4.2 矿山泥石流的形成机理	191
4.3 矿山泥石流的调查	194
4.4 矿山泥石流的预测	196
4.5 矿山泥石流综合防治技术	202

第2篇 矿山地质环境

第5章 采煤对地貌景观与土地资源的破坏及其综合防治技术	210
5.1 采煤对地貌景观与土地资源的破坏	210

5.2	矿区地貌景观与土地破坏现状调查	215
5.3	地貌景观与土地资源破坏状况预测	218
5.4	矿区土地恢复治理技术	221
第6章	采煤对水资源的破坏及其综合防治技术	238
6.1	采煤对水资源的影响分析	238
6.2	采煤对水环境的影响分析	262
6.3	调查与勘察	264
6.4	采煤对地下水影响预测与评价	269
6.5	采煤对水资源影响的综合防治技术研究	278

第3篇 采空区地基稳定性评价及处置

第7章	采空区建筑地基稳定性评价	290
7.1	采空区覆岩失稳“活化”的机理分析	290
7.2	建筑物荷载对覆岩移动和地表变形的影响分析	295
7.3	采空区建筑地基变形破坏的数值模拟研究	304
7.4	采空区建筑地基稳定性评价	323
第8章	采空区碎裂岩体渗透注浆浆液扩散规律及处置工程设计	332
8.1	采空区碎裂岩体渗透注浆浆液扩散规律研究	332
8.2	采空区充填注浆处置工程设计研究	358
第9章	采空区上部建筑物抗变形结构设计研究	365
9.1	采空区上方建筑物的合理布置	365
9.2	抗采动变形建筑物结构设计的基本要求	366
9.3	变形缝的设置	366
9.4	地表变形作用下的附加应力计算	367
9.5	钢筋混凝土圈梁的设计	371
9.6	砖墙的受力计算	372
参考文献	374

第 1 篇 矿山地质灾害

第 1 章 采空区覆岩移动与变形规律

1.1 采空塌陷的形成机制

1.1.1 采空塌陷的形成

所谓采空区是指地下矿体采出后所留下的空间区域。当矿体（如煤、金属矿石等）从地下被开采出来后，上部岩体失去支撑而导致平衡被破坏，岩石力学性质也必然随之发生变化，应力重分布，以期达到新的平衡。在此过程中，采空区上部岩体变形和移动会向上波及地表，地层内部岩石的强度和内聚力会大大降低，在地表呈现出塌陷、裂缝和台阶等多种形式的变形，并形成地表移动盆地。这种由于地下挖掘形成空间，造成上部岩土层在自重作用下失稳而引起的地面塌陷现象，就是采空塌陷。当开采宽度增大到相当大以后，再增加开采宽度对停采上方地表移动和变形几乎没有影响。采空塌陷是一个复杂的时空发展过程。

1.1.2 采空塌陷基本理论

关于覆岩破坏的机理有 4 种比较流行的理论，它们都在不同程度上解释了不同地质条件、不同开采方式和不同开采阶段覆岩破坏和地表移动特征。随着矿山开采技术的发展和人们对岩层破坏变形规律研究的深入，研究认为，即使是在同一地区，对于采空区不同的埋深和区段，其破坏机理也不尽相同。

(1) 拱形冒落论和拱形假说。拱形冒落论是由俄国人 M·M·普落托吉亚科诺夫于 1907 年提出的，德国人哈克和吉列策尔于 1928 年提出压力拱形假说，并完善了拱形冒落理论。该理论认为，采掘时，由于矿体采出形成新的空间和新的临空面，引起一定高度覆岩冒落，直到形成一个近似拱形的形状时才停止冒落，并逐步达到稳定。调查研究表明：在顶板和底板的变形破坏中都存在类似的变形破坏规律。随着开采工作面的不断推进，压力拱也会不断发展。拱形冒落现象常见于覆岩性质坚硬，结构和组成简单的地层，所以这个理论曾得到广泛应用。但是实际上，拱形冒落论和拱形假说仅适用于掘进坑道与跨度较小的采空区，而与大面积采空区覆岩破坏、冒落的实际情况并不相符。

(2) 悬臂梁冒落论与冒落岩块碎胀充填论。悬臂梁冒落论由德国人舒尔兹和施托克提出，

后来得到英国人弗兰德和原苏联人格尔曼的支持。该理论把工作面和采空区上方的顶板看做是梁或板，在初次冒落后，该梁或板的一端固定在工作面和采空区前方的矿壁上，而另一端自由悬露或者支撑在支架或垮落的岩石上，也可能只产生弯曲变形而不折断，当悬臂梁板的悬臂长度很大时，就发生周期性的冒落。冒落的岩块由于破裂或其间存在裂缝而体积膨胀，并填充了采空区所留下的空间，从而限制了覆岩冒落的继续发展，使之逐渐趋向稳定。

(3) 冒落岩块铰接论。它是由苏联的库兹涅佐夫在 20 世纪 50 年代提出的。他将工作面的覆岩的破坏分为两个带，上部是规则的移动带，其移动的岩块相互联系和铰合，成一条铰链形状，在采空区上方规则的下沉。下部的不规则带又分为两个部分，上部的岩块按原来的方向规则的排列，其下部的岩块可以自由地冒落到采空区内，其排列是杂乱无章的。这种理论是今天“三带”分布理论的基础。

(4) 砌体梁平衡理论。该理论是由我国钱鸣高院士提出来的。他认为在工作面附近断裂带的岩层对于上覆岩层的破坏最大，形状有如砖石堆砌而成的砌体结构，故称其为“砌体梁”。其外形是梁，实际是拱，在地层中形成了新的平衡结构。这种学说将覆岩断裂带的岩层在横向分为 3 个区：A 区为矿壁支撑区，B 区为离层区，C 区为重新压实区。上覆断裂带岩层的结构平衡是借助于岩块间由于重力和相互挤压所产生的摩擦力。我国有关学者利用此理论成功地计算和分析了有关采场的岩石结构形态和受力情况，对采场的“砌体梁”理论作了实证。

综合上述 4 种理论，采空区的变形经历了下列过程。

(1) 在采空后，上覆岩层如同梁（或板）的受力情况，在竖直方向上从上至下，应力由压变拉，中间的附加应力存在零点。由于上覆岩层的自重较大，岩石的抗拉强度较小，于是下部岩层开始发生变形破坏并且逐渐向上扩散并波及地表。

(2) 由于采空区的埋深较大，上覆岩层中存在厚度、强度较大的岩层，形成悬臂梁，使采空区的跨度层减小。

(3) 在重力作用和摩擦力作用下，上覆岩层向采空区的中心地带移动，由于岩石具有一定的黏聚力，并不会向流体一样完全涌向采空区，岩石内部的黏聚力、内摩擦角和岩层间的摩擦、黏结等作用，致使变形的范围向上不断扩大，应力不断消散。

(4) 由于岩石的破碎存在一定的碎胀性，对下部的采空区具有填实作用，“三带”逐渐形成。

(5) 当采空区被填充后，“三带”互相连接或形成稳定结构，可以进行应力的传递，覆岩在蠕变作用下，逐渐被压实而趋于稳定。

1.1.3 影响矿山沉陷的主要因素

(1) 采空区的开采方式和开采面积。一般来讲，对于缓倾斜煤层，从覆岩的破坏程度来讲，非充分采动的破坏高度小于充分采动的破坏高度。但是对于充分采动性质的采空区，由于采动面积大，破坏程度大，在经过一定的年限后，破坏部分压实比较充分的地基稳定性较好。

(2) 顶板管理方式。就煤矿的回采工作面顶板管理而言，基本顶是主要支撑对象，直接顶是主要维护对象，即顶板管理中的“支”与“护”是针对不同的对象采取的相应的控

制措施。伪顶板尽管也属于顶板范畴，但一般不作为顶板管理的对象，顶板以上的上覆岩层，一般不作为工作面顶板管理的考虑范围。顶板管理方式对采动区地表的变形移动规律有很大影响，它直接关系到采空区的填充方式和填充的密实度，进而关系到上部一定年代覆岩在附加荷载作用下的地基稳定性。

(3) 上部岩石的组成、层位及其岩石的物理力学性质。采动区岩石的完整程度受到较大破坏，裂缝发展比较充分。但一般来讲，岩石的硬度较大时，采动区的沉降值较小，反之则大。当地层中含有较软或富含水层的岩石或者是流沙，由于岩石的变形、破坏和地层移动，会起到疏干作用，可能会出现地层移动沉降速度加快和地表最大沉降值大于采空区的高度。岩层的层位对于地表的移动也有较大的影响，主要表现在两个方面：①物理性质和厚度都差异较大的岩层层位对地表变形的剧烈程度影响较大；②在倾斜岩层中，层位不同会影响到两带的分布高度。

(4) 开采深度（采空区的埋深）。一般来说，随着开采深度的增加，最大沉降值将减小，当采空区的深厚比大于150倍时，其影响就非常小了。另一方面，采空区的埋深增大，地表的移动变形时间就越长，但是其地表的残余变形也趋向均匀。

(5) 上部土层的厚度。一般来讲，土体的物理力学性质远低于岩体，在采空区的破坏变形中，土层一般随基岩的变形而变形，即岩层、土层的变化范围一致。主要影响角在岩体和土体的扩散程度是不同的。当矿层及其上覆岩层的倾角很小时，最大水平位移一般情况下取决于最大沉降值。当土层很厚时，其性质对地表移动有很大的影响，它可以使地表出现的移动和变形分布规律不同于基岩，而且可以掩盖和缓冲基岩中的各种裂缝及其破坏，并缓和地表变形曲率。

(6) 采空区的倾角。采空区倾角的增大，会使地表的水平位移增加，出现地表裂缝的可能性增加，地基出现不均匀沉降的可能性增加。倾斜采空区使上覆岩土体的应力分布更加趋于复杂，造成采空区及其以上部分的位置不对称，尤其对主要影响角的影响较大。同时，倾角较大的采空区会使上部岩土体中的裂隙和节理更加发育。

(7) 岩体本身的缺陷。实际中，岩体中赋存着无数的节理面、裂隙面和断层等，这样岩体的强度会大大降低。无论是规则分布还是杂乱无章，在岩层移动的情况下，都会促使裂缝区的扩大、变形加剧。有资料表明，岩层移动所产生的裂缝几乎全是原有裂缝的发展和扩大，而不产生新的裂缝。

(8) 边缘煤柱的稳定性。在采用煤柱支撑法管理顶板时，煤柱的稳定性是至关重要的。岩层的变形和破坏是从直接顶开始，自下而上扩散，破坏时，直接顶最下部岩层的膨胀性最大。因此，基本顶和所有上覆层的下沉量一般都比煤层开采的高度要小。这样，在很长一段时期内，在煤柱内部，尤其是煤柱边缘区存在着较大的集中应力。如果煤柱边缘区因应力过大而导致其破坏，岩层的两帮会失去支撑，将会引起应力调整而使裂隙带的高度继续增大，从而导致支撑压力向煤柱深部发展，同时会引起基本顶悬臂跨度的增大。若煤柱根本不足以承受覆岩的压力，在一段时间内，煤柱将被压垮。

(9) 采煤厚度。采煤厚度是造成采空区覆岩破坏的根本因素之一。研究资料表明：随着采厚的增加，冒落带和裂隙带的高度按线性比例增加，即在相同条件下，采厚越大，破坏波及的范围就越大，岩石的破坏也就越严重。

1.2 矿山塌陷的基本规律和特征

1.2.1 覆岩破坏及其分布特征

1.2.1.1 覆岩破坏的垂直分带

在采用全部垮落法和煤柱支撑法管理顶板而采用条带开采时,采空区上覆岩层的变形破坏从下向上可以划分为冒落带、裂隙带和弯沉带3个特征不同的区域(图1.2-1),即通常所说的“竖三带”。

1. 冒落带

冒落带是指采用全部垮落法管理顶板时,采煤工作面放顶引起的煤层直接顶板的破坏范围。其形成的机理主要是顶板岩石在自重作用下发生法向弯曲,当岩层内拉应力超过岩石强度时,破碎成块、冒落而形成,且越是靠近煤层岩石越是破碎、紊乱。冒落带内岩块的破坏状况具有以下特点:

(1) 不规则性。一般情况下,岩性越坚硬,岩层厚度越大,初次采动情况下冒落岩块块度越大;岩性越软弱,岩层厚度越小,冒落岩块块度越小。根据冒落岩块的破坏和堆积状况,冒落带分为不规则冒落和规则冒落两部分,在不规则冒落带内,岩层完全失去了原有的层次;在规则冒落带内,岩层基本保持原有层次。

(2) 碎胀性。顶板岩层冒落到采空区后,其体积较未冒落前增大,这是冒落带的另一显著特点。通常用岩石碎胀系数来描述冒落带岩石的破碎程度,岩石的碎胀系数取决于岩石的性质,其值一般恒大于1。采煤结束后,冒落岩块的碎胀性是使冒落现象能够自行停止的根本原因。

(3) 冒落带发育高度。冒落带的高度取决于采出煤层的厚度、岩石的碎胀系数和采矿方法。对于长壁全部垮落法采煤方法而言,通常为采出煤层厚度的3~5倍。一般来讲,矿层越薄,冒落带高度越小,顶板管理方式不同,冒落带的高度也不同。冒落带高度 H_k 可采用如下经验公式进行估算:

$$H_k = \frac{M}{K_p - 1} \quad (1.2-1)$$

式中: M 为煤层的采厚, m; K_p 为碎胀系数,这里保守的取为1.1。

碎胀系数与岩石的物理性质、碎胀后块度的大小及其排列状态等因素有关。关于碎胀系数,各种资料的意见分歧较大,而且其试验测定也非常复杂。美国矿业局对各种岩石的碎胀性进行的统计研究表明:破碎后的岩石比未破碎岩石的原体积平均增加60%,体积的增加与岩石的块度成比例。但在压力的作用下,膨胀了的体积又将缩小。可见其大小与时间因素有关。

2. 裂隙带

冒落带以上到弯沉带之间为裂隙带。裂隙带主要由岩层离层及其相对滑移而生成,与冒落带之间并无明显的界限。裂隙带内岩层的破坏状况不同于冒落带的显著特点主要有:

(1) 裂隙的形式及其分布有一定的规律性。一般是发生垂直或近于垂直层面的裂隙

(竖向破断裂隙),即断裂(岩层全部开裂)和开裂(岩层不全部断开)。岩层断裂和开裂的发生与否及断开程度,除取决于岩层所承受的变形性质和大小外,还与岩性、层厚及其空间位置有密切关系。一般靠近冒落带的岩层,断裂严重;远离冒落带的岩层,断裂轻微。除了垂直或近于垂直层面的裂隙外,还产生顺层面脱开的裂隙(离层裂隙),离层裂隙的产生,说明覆岩破坏由下而上的扩散式发展过程。

(2)分带性。根据岩层的断裂、开裂及离层的发育程度,裂隙带在垂直剖面上可以分为严重断裂、一般开裂和微细开裂3个部分:①严重断裂,大部分岩层为全厚度断开,但仍然保持原有的沉积层次,裂隙间的连通性好;②一般开裂,岩层在其全厚度内未断开或很少断开,层次完整,裂隙间的连通性较好;③微细开裂,部分岩层有微细裂隙,基本上不断开,裂隙间的连通性不太好。

(3)裂隙间的连通性受变形状态的影响。采动结束后的稳定阶段,下沉盆地内边缘不均匀下沉区岩层上、下部中的垂直裂隙(拉伸和压缩)与离层裂隙往往是彼此连通的,连通区的范围也大一些;下沉盆地中央均匀下沉区岩层上、下部中的垂直裂隙(断裂)与离层裂隙则是不连通的,连通区的范围小一些。采动过程中的情况则完全相反,即下沉盆地边缘不均匀下沉区岩层上、下部中垂直裂隙(断裂)则多为连通性的。

(4)裂隙带发育高度。裂隙带高度 H_L 可由如下经验公式进行估算:

$$H_L = \frac{100M}{cM+d} \quad (1.2-2)$$

式中: M 为煤层的采厚, m ; c 、 d 为经验系数,因地质情况差异而变化。

3. 弯沉带

弯沉带是指自裂隙带顶界到地表的整个岩系。从裂隙带往上直到地表,发生了大范围移动和变形,但仍保持岩体原始结构而不破坏,其移动与变形连续、平稳而有规律,这种在自重作用下产生的弯曲变形区称为弯沉带,也叫做整体移动带。弯沉带的特点是其带内岩层将保持其整体性和层状结构,其移动过程连续而有规律,岩层呈平缓之弯曲。岩层移动的整体性是弯沉带的显著特点,所谓整体性,就是裂隙带顶界以上至地表的岩层移动是成层地、整体性发生的,在垂直剖面图上,其上下各部分的沉降差异很小,一般不会出现离层现象。但弯沉带或整体移动带内的岩层有时也可能产生裂隙,但是裂隙微小,数量较少,裂隙间的连通性不好,导水能力微弱,而且随着移动过程的发展,岩层受压程度越来越高,受到破坏的岩层隔水性也会越来越得到恢复。

总之,采空区的“三带”特征是为了研究方便而人为划分的,事实上覆岩的破坏形态是连续的,它们之间存在一定的过渡高度。

1.2.1.2 覆岩破坏的水平分区

煤层开采后,在采空区的上部岩土层中一般还会形成“横三区”,即煤壁支撑区、离层区和重新压实区,如图1.2-1所示,裂隙带岩层中相当于

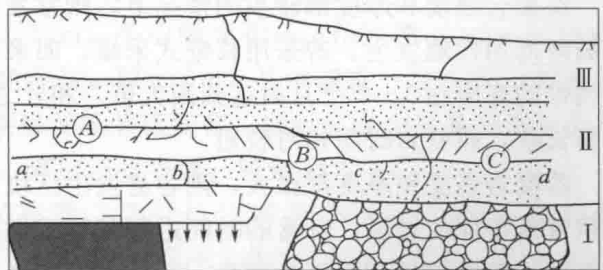


图1.2-1 覆岩破坏的“竖三带”与“横三区”

I—冒落带; II—裂隙带; III—弯沉带;

A—煤壁支撑区(a-b); B—离层区(b-c);

C—重新压实区(c-d)

A区的部分称为煤壁支撑区，B区部分称为离层区，C区称为重新压实区。煤壁支撑区的特点是煤层上方的岩层在开采影响下，一般在回采工作面前方30~40m处就开始变形，其水平位移较为剧烈，但垂直移动则甚微，当工作面推过此区域，才会引起垂直位移急剧增加。离层区的特点是当回采工作面推进此区域内，岩层垂直位移急剧增加，但各层位移速度不尽相同，越向上越缓慢，在此区域内形成层间离层。重新压实区的特点是当已断裂的岩层重新受到已冒落矸石支撑时，邻近煤层的岩层，其运动速度要缓于其上覆岩层，各岩层进入互相压合的过程。

1.2.1.3 覆岩破坏性影响范围的形态特征

在采用全部垮落法管理顶板时，覆岩破坏性影响范围的形态特征与煤层的产状有关，也受覆岩岩性的影响。

(1) 水平及缓倾斜煤层 ($0^{\circ}\sim 35^{\circ}$)。在沿采空区走向和倾向剖面上，水平及缓倾斜煤层整个覆岩破坏影响范围形态类似于马鞍形，采空区四周边界上方覆岩破坏性影响范围的高度略高于中部，最高点位于开采边界以内或以外数米内。

(2) 中倾斜煤层 ($36^{\circ}\sim 54^{\circ}$)。中倾斜煤层冒落带和裂隙带的最大高度位于采空区上边界附近的上方，下边界上方的破坏高度则较小，整个覆岩破坏性影响范围的形态呈上大下小的抛物线形状。

(3) 急倾斜煤层 ($55^{\circ}\sim 90^{\circ}$)。急倾斜煤层覆岩破坏性影响范围偏重于采空区上边界，而在下边界微弱。同时，破坏性影响除波及顶板外，底板也受到破坏性影响，因而形成不同倾角覆岩的破坏性影响范围，呈现不同形态的拱形。倾角 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 覆岩破坏性影响范围可以扩展到采空区上边界以上的垂直方向上，其影响高度大致与顶板法线方向的影响高度相当，形态呈类似抛物线的拱形形状；倾角 $71^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 覆岩破坏性影响范围，在采空区上边界以上垂直方向上的高度大于顶板法线上的破坏范围高度，形态呈不完全的椭圆拱形形状；倾角 $81^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 覆岩破坏性影响范围更广，除顶板覆岩外，其底板围岩也受到破坏性影响，被采煤层早于顶板、底板发生破坏，造成破坏影响范围形态类似一个完全的椭圆形拱形，而此椭圆的最高点是在煤层内。

1.2.2 覆岩破坏的时间进程

煤矿开采覆岩破坏的时间进程受多方面因素的控制。

在覆岩强度和厚度都较小的情况下，则常发生碎块小面积冒落，冒落时间随采煤工序的循环周期性地发生。若采用长壁式采煤，回采一次，冒落一次。冒落之后，冒落带上方断裂带的高度在1~2个月内达到最大值。相比之下，坚硬覆岩断裂带达到最大高度的时间要长些，而软岩时间相对较短。

若覆岩强度和厚度都很大，则容易发生巨块大面积冒落。实际统计表明，具有巨块大面积冒落特性的岩层，冒落的时间进程基本无规律可循，而且具有突发性冒落的特点。大规模冒落常常引发“陷落地震”，巨大的能量迅速释放，强劲的冲击波常常给矿井生产、人身安全造成威胁。但是，在大规模冒落之前，必有或多或少的征兆，只要加强观测，注意警戒和提防，这种灾害是可以避免的。

在覆岩冒落、断裂带高度达到最大值以后，则出现稳定状态和断裂带高度有所降低的

现象。如坚硬覆岩在断裂带高度达到最大值以后,基本处于稳定状态,不再发生变化。软岩断裂带达到最大值后,随时间推移,其高度逐渐降低。

1.3 采空区覆岩移动变形规律的相似模拟实验研究

本研究以霍州矿务局辛置煤矿、柳林县同德煤矿和康家沟煤矿地质采矿条件为背景,采用相似材料模拟实验方法,探讨采空区覆岩移动变形规律。

1.3.1 研究区地质采矿条件

1.3.1.1 辛置煤矿地质采矿条件

霍州矿务局辛置煤矿位于霍西煤田的中南部,缓铺在霍山西,汾河之东岸。行政区划属山西省临汾市霍州市所辖,位于霍州市东南10余km处,距南同浦铁路线辛置火车站0.5km。井田面积47km²,可采及局部可采煤层为6层,自上而下分别为2号、5号、6号、9号、10号、11号,其中2号、10号、11号为稳定可采煤层,5号、6号、9号为局部可采煤层,6层煤层总厚8.85m,煤质以肥煤为主,地质储量为3.88亿t。全井田呈一近似的单斜构造,走向NNE,倾向SEE,倾角5°~12°,平均倾角为8°。地质构造较为复杂,以中小型断层、褶曲、陷落柱为主,局部地段有古河床冲刷。水文地质条件是上组煤简单,下组煤较为复杂。

本研究现场实验工作布置在辛置煤矿2203、2204工作面上,其上方相对位于辛置镇董家庄村南0.3km处,有一条简易公路,无其他建筑物,全为农田,仅在沟谷部位有基岩出露,为二叠系上石盒子组中段地层,地表大部分被黄土覆盖,岩性为第四系的Q₂、Q₃黄土,部分具有非自重湿陷性。

试采的2203、2204工作面主采2号煤层。根据工作面附近的1~74号钻孔资料,工作面覆岩厚度为201.17m,其中黄土层厚75.62m,占37.6%;中、细砂岩为42.87m,占21.3%;泥岩、泥质砂岩为82.68m,占41.1%。

2203工作面2号煤层厚度为3.38~3.74m,平均厚度3.59m。伪顶为黑色泥岩,厚0~0.28m;直接顶为灰黑色砂质泥岩,厚2.0m,其中部有一层0.1~0.2m的煤线;老顶为K₈灰白色中-细粒砂岩,厚度10m。煤层顶板节理发育,顶板岩层在开采后有良好的自然冒落条件。本工作面地质构造较为简单,煤层产状平缓,倾角为2°~5°。

2204工作面2号煤层厚度为3.41~3.72m,平均厚3.65m。伪顶厚0.02~0.15m,由黑色泥岩及砂质泥岩组成;直接顶为黑色泥岩,厚2.0m,其中部有一层0.25m厚的煤线;老顶为K₈中粒白砂岩,厚7.18m。煤层顶板节理发育,顶板在开采后具有良好的自然冒落条件。该工作面地质构造较为简单,煤层产状平缓,倾角为2°~7°。

2203、2204工作面皆以走向长壁式布置,走向长分别为560m、468m,倾斜长104m。分两层开采,上分层开采采用150机组,开采顺序为先采2203工作面,后采2204工作面,下分层回采顺序同前。两工作面留有20m的顺槽煤柱,下分层是在上分层的基础上内错10m布置的。采用顶板全部陷落回采,每昼夜推进度为1.48~2.13m,平均1.8m。

1.3.1.2 柳林县同德煤矿、康家沟煤矿地质采矿条件

1. 地层岩性

柳林县同德煤矿、康家沟煤矿位于柳林县西北 12km 处, 研究区揭露地层自上而下分别为第四系、新近系、二叠系和石炭系, 简述如下:

(1) 第四系全新统选任组 (Q_4^x): 分布于三川河及河谷两侧 I 级河谷阶地, 下部主要为河床相碎石土, 上部主要为河漫滩相砂土和粉土。具双层结构, 厚度 2~5m。

(2) 第四系上更新统峙峪组 (Q_3^s): 分布于三川河河谷 II 级阶地上, 为一套冲积为主夹洪积的沉积物。结构稍密-中密, 岩性为黏土、粉土夹透镜状砂土和碎石土, 土质疏松, 具多层结构类型, 厚度 10~20m。

(3) 第四系上更新统马兰组 (Q_3^m): 覆盖于梁、源、崞上, 属风积物, 硬塑-坚硬状态, 垂直节理发育。具有大孔隙, 均一结构类型, 厚度 5~40m。

(4) 第四系中更新统离石组 (Q_2^l): 分布于梁、塬、崞及冲沟两侧, 为风积及冲积形成, 岩性以黄土为主, 颜色为棕黄色、浅棕红色亚黏土, 夹数层棕色古土壤层、钙质结核层及透镜状砂卵石层, 硬塑-坚硬状态, 柱状节理发育, 多层结构类型。厚度 20~50m。

(5) 新近系上新统保德组 (N_2^b): 角度不整合在下伏基岩之上, 为一套深红色黏土, 坚硬, 含铁锰质膜。局部地段底部发育砾石层, 厚度约 15m。

(6) 二叠系石千峰组 (P_2^{sh}): 岩性为红、深红、紫红色粉细砂岩夹中厚层细-粗粒长石砂岩及钙质结核层。本组厚度约 180m。

(7) 二叠系上石盒子组 (P_2^s): 出露于师婆沟煤矿及康家沟煤矿一带, 岩性为灰绿、黄绿、灰紫色页岩与灰绿色长石石英杂砂岩互层, 由下向上紫色页岩逐渐增多, 浅黄、灰黄、浅灰色中细砂岩和泥岩组成。其底部标志层岩性为紫红色、灰黄色铝土质鲕粒泥岩(俗称桃花泥岩), 含丰富的铁锰质。本组厚度约 390m。

(8) 二叠系下统下石盒子组 (P_1^x): 零星出露, 岩性主要为灰白色砂岩、灰黑色泥岩及粉砂岩组成, 下部夹煤线。本组厚度约 70m。

(9) 二叠系下统山西组 (P_1^s): 出露于青龙煤矿、同德焦煤公司一带, 下部为灰黑色炭质页岩、砂质页岩、粉砂岩夹中厚层细粒石英杂砂岩、长石岩屑砂岩及煤层(4号、5号)。上部为灰褐色砂质泥岩夹长石石英砂岩及煤线(1号、2号、3号)。其中4号煤层较稳定, 钻孔曾揭露煤层最大厚度 4.3m, 4号煤层为主采煤层, 采厚一般为 2.3m; 5号煤层厚度 2.5m。本组厚度约 50m。

(10) 石炭系太原组 (C_3^t): 底部为山西式铁矿; 下部为鲕状铝质泥岩及致密块状铝质黏土岩; 中部为灰黑色泥岩、黏土岩、砂质页岩, 夹中细粒石英杂砂岩, 透镜状含生物碎屑灰岩及煤层(8号、9号、10号), 煤层厚度变化较大, 为可采煤, 以 10号煤为主, 局部合并; 上部为 3 层厚层状灰岩夹泥质粉砂岩、页岩、长石石英杂砂岩及薄煤层。本组厚度约 105m。

2. 煤矿采空区分布

(1) 同德煤矿采空区可采煤层主要有 2 层, 分别为 4 号、5 号煤层, 煤层产状 $237^\circ \angle 2^\circ \sim 6^\circ$, 埋深 68~192.95m, 4 号煤层与 5 号煤层间距 10m。1926 年开采至今, 斜井开拓, 采

厚为 2.3m, 年实际生产能力 60 万 t, 采空区顶板岩性为泥岩, 底板岩性为泥岩, 少量淋水, 长壁式开采, 全部陷落法管理顶板, 回采率 80%。

(2) 康家沟煤矿采空区可采煤层主要有 3 层, 分别为 4 号、5 号和 10 号煤层, 煤层产状 $249^{\circ}/4^{\circ}$, 埋深 130~245m, 煤层间距平均为 10m 和 33m。1997 年开采至今, 立井开拓, 开采 4 号煤层, 采厚 2.4m, 年实际生产能力 45 万 t, 采空区顶板岩性为泥岩, 底板岩性为泥岩, 少量淋水, 长壁式开采, 全部陷落法管理顶板, 回采率 80%。

1.3.2 实验模型和实验方法

1.3.2.1 实验模型的设计

1. 模型设计尺寸

实验以霍州矿务局辛置煤矿、柳林县同德煤矿和康家沟煤矿地质采矿条件为原型, 采用平面相似模拟实验架进行。根据各煤矿不同的地质采矿条件, 共设计 6 组实验模型。

模型 A: 以霍州矿务局辛置煤矿地质采矿条件为原型 (表 1.3-1), 模型总高度 222cm, 模拟采深 198cm, 模拟开采 2 号煤层, 采厚 4cm。

表 1.3-1 模型 A 岩层物理力学参数表

编号	岩层名称	层厚 /m	累计厚度 /m	弹性模量 E/GPa	容重 /($\times 10^3$ kg/m ³)	泊松比 μ	抗压强度 R_C /MPa	抗拉强度 R_P /MPa	抗剪强度	
									$\tan\varphi$	C/MPa
1	黄土 (Q ₂ 、Q ₃)	75.62	75.62	50.000	1.700	0.350	0.10	—	0.31	0.01
2	泥岩	10.41	86.03	10.691	2.163	0.467	21.13	2.04	0.625	1.75
3	细砂岩 K ₁₀	20.91	106.94	6.804	2.507	0.464	37.09	5.68	0.518	5.23
4	泥岩	15.36	122.30	4.153	2.333	0.314	17.07	2.01	0.554	1.37
5	细砂岩	4.55	126.85	13.807	2.634	0.159	66.89	8.02	0.510	7.96
6	泥岩	13.45	140.30	4.810	2.410	0.255	57.51	4.93	0.910	4.51
7	细砂岩	1.40	141.70	7.668	2.481	0.117	48.52	4.88	0.557	7.48
8	泥岩	7.11	148.81	4.809	2.432	0.346	35.76	2.82	0.570	3.22
9	细砂岩 K ₉	4.55	153.36	12.128	2.566	0.352	50.03	2.18	0.623	3.32
10	泥岩	7.21	160.57	3.908	2.535	0.478	17.84	2.14	0.607	1.25
11	细砂岩	1.43	162.00	5.473	2.483	0.464	47.69	6.03	0.568	6.81
12	泥岩	4.15	166.15	4.166	2.452	0.329	41.03	3.71	0.574	3.91
13	砂质泥岩	3.90	170.05	4.774	2.470	0.294	34.88	3.23	0.863	2.09
14	泥岩	19.01	189.06	8.014	2.515	0.293	34.92	2.37	0.781	2.72
15	灰白色中细砂岩 K ₈	10.03	199.09	8.407	2.556	0.241	75.83	8.35	0.619	13.42
16	灰黑色泥岩	2.08	201.17	6.305	2.349	0.473	29.21	2.54	0.708	3.27
17	2 号煤层	3.59	204.76	0.605	1.362	0.254	9.60	—	0.563	1.81
18	黑色泥岩	4.96	209.72	9.576	2.652	0.321	54.01	—	0.754	3.53
19	砂质泥岩	3.07	213.79	4.278	2.425	0.346	39.72	3.24	0.708	3.27
20	中砂岩	8.78	223.57	5.103	2.447	0.392	26.11	2.89	0.502	4.23

模型 B: 在表 1.3-1 中去掉了第 2~9 层, 第 10 层以上为 25cm 的黄土。模型总高度 83cm, 模拟采深 63cm, 模拟开采 2 号煤层, 采厚 4cm。

模型 C: 以同德煤矿小窑采空区地质条件为原型 (表 1.3-2), 模型总高度 86.8cm, 模拟采深为 59.8~75.8cm 不等, 模拟开采 4 号煤层, 采厚 4cm。本实验段地质剖面图如图 1.3-1 所示。

表 1.3-2 模型 C 岩层物理力学参数表

编号	岩层名称	层厚 /m	累计厚度 /m	弹性模量 E/GPa	容重 /($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	泊松比 μ	抗压强度 R_C/MPa	抗拉强度 R_P/MPa	抗剪强度	
									黏聚力 c	内摩擦角 φ
1	黄土	21.80	21.80	—	—	—	—	—	—	—
2	中粒砂岩	2.50	24.30	—	2.42	—	57.50	—	—	—
3	泥岩	13.90	38.20	—	2.55	—	41.35	0.65	1.30	46.5
4	中粒砂岩	13.49	51.69	1.56	2.54	0.435	79.40	3.75	5.40	42.3
5	泥岩	4.68	56.37	—	2.56	—	75.05	—	—	—
6	砂岩	4.28	60.65	1.05	2.69	0.185	116.80	5.70	5.50	45.3
7	泥岩	5.08	65.73	0.71	2.54	0.290	99.05	0.55	1.10	50.2
8	砂岩	2.48	68.21	1.00	2.34	0.240	71.50	3.60	4.70	45.4
9	泥岩	3.09	71.30	—	2.54	—	114.60	1.10	—	—
10	4 号煤层	4.30	75.60	0.60	1.36	0.250	40.40	—	1.81	0.56
11	泥岩	1.74	77.34	1.17	2.55	0.320	119.50	0.95	1.02	45.2
12	泥质砂岩	5.43	82.77	1.06	2.52	0.280	92.50	4.35	5.02	34.3
13	中砂岩	7.83	90.60	1.12	2.50	0.350	105.20	4.06	—	—

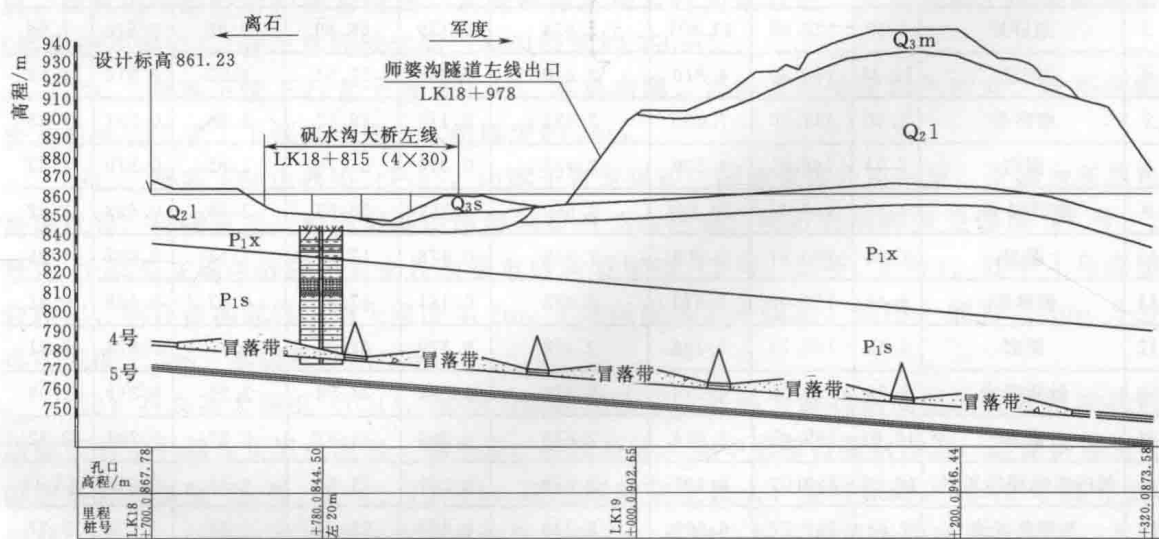


图 1.3-1 模型 C 地质剖面图

模型 D: 以康家沟煤矿地质采矿条件为原型 (表 1.3-3), 模型总高度 197.94cm, 模拟采深 143.4~182.9cm 不等, 长壁开采方式, 模拟开采 4 号煤层, 采厚 4cm。本实验段地质剖面图如图 1.3-2 所示。